

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт
институт
Межинститутская базовая кафедра
«Прикладная физика и космические технологии»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.Е. Косенко
подпись инициалы, фамилия
« _____ » _____ 2019 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Проектирование электронасосного агрегата для космических аппаратов
повышенной мощности
тема

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных
производств»

код и наименование направления

15.04.05.02 Технология космических аппаратов

код и наименование магистерской программы

Научный руководитель	_____	доцент кафедры МБК ПФКТ, канд.техн.наук	<u>В.Н.Наговицин</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		<u>А.В. Смирнов</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Рецензент	_____	начальник группы 30212 АО «ИСС»	<u>А.А. Логанов</u>
	подпись, дата	канд.техн.наук	инициалы, фамилия
Нормоконтролёр	_____		<u>Е.С. Сидорова</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия

Красноярск 2019

Федеральное государственное автономное

образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт
институт

Межинститутская базовая кафедра
«Прикладная физика и космические технологии»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.Е. Косенко
подпись инициалы, фамилия
« ____ » _____ 20 ____ г

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме магистерской диссертации

Студенту: Смирнову Алексею Васильевичу

Группа МТ17-04М, направление (специальность) 15.04.05

Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств.

Тема выпускной квалификационной работы: Проектирование электронасосного агрегата для космических аппаратов повышенной мощности.

Утверждена приказом по университету №15408/с от 24.10.2017 г.

Руководитель ВКР: В.Н. Наговицин доцент кафедры МБК ПФКТ, канд. техн. наук

Исходные данные для ВКР: Основные требования предъявляемые к двухступенчатому электронасосному агрегату; характеристики существующих электронасосных агрегатов для космических аппаратов.

Перечень разделов ВКР: Анализ исходных данных, экспериментальные исследования, компоновочные и конструктивные решения, расчёт основных проектных параметров

Перечень графического материала: слайды презентации в количестве 12 шт.

Руководитель ВКР

_____ В.Н. Наговицин
подпись инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению

_____ А.В. Смирнов
подпись, инициалы и фамилия студента

« ____ » _____ 20__ г.

РЕФЕРАТ

На современном этапе развития жидкостных систем терморегулирования (СТР) автоматических космических аппаратов (КА) является актуальной проблема обеспечения комплекса функциональных характеристик, в том числе:

- 1) повышенная в сравнении с существующими КА эффективность теплоотвода с учётом разработки КА мощностью более 10 кВт;
- 2) более высокие габаритно-массовые характеристики всех составных частей жидкостной СТР КА;
- 3) повышенная устойчивость автоматических КА к механическим воздействиям метеоритных тел малых размеров;
- 4) меньшая масса трубопроводов жидкостного контура.

Одним из наиболее действенных способов обеспечить данный комплекс характеристик является уменьшение проходного сечения трубопроводов гидравлического тракта при сохранении массового расхода жидкого теплоносителя. При этом повышенная эффективность теплоотвода достигается за счёт увеличения скорости движения теплоносителя по трубам, при этом пропорционально уменьшению диаметра трубопроводов снижается их масса. Также за счёт уменьшения диаметров трубопроводов уменьшается площадь проекции трубопроводов на плоскость, перпендикулярную направлению возможного движения метеоритных тел. При этом снижается вероятность попадания метеоритных тел в трубопроводы.

Закономерным следствием уменьшения диаметра проходного сечения трубопроводов при сохранении массового расхода теплоносителя является значительное повышение гидравлического сопротивления трубопроводов. Обеспечить преодоление повышенного сопротивления можно применением электронасосного агрегата (ЭНА) с повышенным перепадом давления. Так как при уменьшении диаметра трубопроводов скорость потока в трубах меняется обратно пропорционально второй степени отношения диаметров труб, сопротивление трубопроводов увеличивается очень существенно, в два-три раза. Наиболее простым решением представляется установка последовательно

двух или трёх ЭНА имеющихся типов. Но при этом пропорционально увеличению перепада давления увеличивается масса насосной установки, резко уменьшая выигрыш в массе от применения. При этом, пропорционально увеличению числа последовательно подключённых ЭНА вырастет вероятность отказа одного из электродвигателей ЭНА. После полного выхода из строя одного из последовательно установленных ЭНА оставшиеся уже не смогут обеспечивать заданные расходно-напорные характеристики. Это означает, что какое-то время часть полезной нагрузки КА не может быть использована по целевому назначению. Следовательно, последовательное подключение нескольких ЭНА не является удачным решением проблемы преодоления возросшего перепада давления. Наиболее эффективным способом значительно повысить развиваемый ЭНА перепад давления является применение двухступенчатой схемы.

Использование в ЭНА двухступенчатой схемы ставит новые проектные, конструкторские и технологические проблемы. Основным источником таких проблем являются потери давления, в частности, на обратное перетекание теплоносителя с выхода второй ступени на вход через зазоры конструкции. Расход протечек жидкости через щелевое уплотнение пропорционален третьей степени величины зазора в уплотнении. Кроме того, при повышении температуры теплоносителя (рабочей жидкости) на входе в насос снижается его вязкость, а значит, уменьшается сопротивление перетеканию. Следовательно, необходим комплекс проектных, конструкторских и технологических решений, реализация которых сведёт это перетекание к приемлемому минимуму и в максимальной степени устранил другие причины потерь давления.

Также требует решения важная проблема обеспечения минимально возможной массы двухступенчатого ЭНА при достижении максимально возможного КПД, а вместе с ним – минимальными нагрузками на ротор электродвигателя (ЭД) ЭНА. Критичным с точки зрения массы именно двухступенчатого насоса является размер спирального отвода ЭНА каждой из двух ступеней.

Дополнительным преимуществом применения двухступенчатого ЭНА является возможность снижения механических нагрузок, возникающих в процессе функционирования и передаваемых с рабочего колеса на ротор электродвигателя. Так как выходы обеих ступеней насоса могут быть размещены в довольно большом диапазоне углов один относительно другого, то можно выбрать такое их взаимное положение, при котором по условию баланса сил передаваемые на опоры ротора нагрузки могут быть существенно снижены. Эта возможность имеет большое значение с точки зрения обеспечения длительного функционирования ЭНА. Специфические условия эксплуатации на борту КА обуславливают особые требования к надежности агрегатов без возможности дополнительного осмотра и проведения регламентных работ. Ограничения по массе и габаритам не позволяют задавать избыточный запас прочности конструкции, поэтому необходима достоверная и точная оценка характеристик ЭНА ещё на этапе проектирования. Следовательно, должны быть усовершенствованы методики проектного расчёта ЭНА.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	9
1 Общая часть	11
1.1 Система терморегулирования на базе однофазного контура	11
2 Анализ состояния и выбор направления исследования	14
2.1 Анализ исходных данных	14
2.2 Анализ существующих решений	16
2.3 Заключение по направлению исследования	27
3 Теоретические и экспериментальные исследования	29
3.1 Анализ существующих методов проектных расчётов	29
3.2 Исследования по совершенствованию методики проектного расчёта	31
3.3 Проверка косвенной погрешности результатов измерений, использованных при исследовании спирального отвода электронасосного агрегата	43
3.4 Экспресс-методика определения наружного диаметра рабочего колеса электронасосного агрегата	46
3.5 Проверка косвенной погрешности результатов измерений, использованных при выборе наружного диаметра рабочего колеса электронасосного агрегата	49
4 Проверка выполнимости требований по ресурсу электронасосного агрегата	51
4.1 Анализ данных по ресурсу имеющихся аналогов	51
4.2 Анализ расчетной схемы определения нагрузки на аналоге	51
4.2.1 Расчет неуравновешенной силы от дисбаланса рабочего колеса и ротора электродвигателя	52
4.2.2 Определение нагрузок на подшипники электродвигателя	53
4.3 Анализ расчетной схемы определения нагрузки на разрабатываемом электронасосном агрегате	55

4.3.1	Определение исходных силовых факторов для двухступенчатого электронасосного агрегата	56
4.3.2	Определение нагрузок на подшипники электродвигателя	56
4.3.3	Оценка результатов определения нагрузок на подшипники электродвигателя	57
5	Компоновочные и конструктивные решения для двухступенчатого электронасосного агрегата	60
6	Расчёт основных проектных параметров двухступенчатого электронасосного агрегата	64
6.1	Выбор электродвигателя	64
6.2	Расчет рабочего колеса двухступенчатого электронасосного агрегата	66
6.2.1	Расчет параметров на входе в колесо для одной ступени	66
6.2.2	Расчёт параметров в лопаточном аппарате рабочего колеса	67
6.2.3	Расчет и выбор основных элементов выхода из колеса	69
6.2.4	Расчет параметров лопастей колеса	71
6.2.5	Расчет вспомогательных гидравлических трактов	72
6.2.6	Расчет параметров отвода из насоса	73
6.3	Рекомендации по способу изготовления электронасосного агрегата	75
6.3.1	Оценка зазоров на пути рабочей жидкости между ступенями	78
	Выводы	85
	Заключение	86
	Список сокращений	87
	Список использованных источников	88

ВВЕДЕНИЕ

Целью исследования является решение научно-технических проблем разработки проектных и конструкторских решений, обеспечивающих создание двухступенчатого ЭНА для новых автоматических КА со сроком активного существования 15 лет. К числу собственно научных проблем относится создание методики достоверного проектного расчёта спирального отвода центробежного насоса.

Задачи исследования:

1 Выявление зависимости между геометрическими параметрами спирального сборника отвода ЭНА и наивысшей энергетической эффективности центробежного насоса для повышения достоверности проектного расчёта применительно к штатной рабочей жидкости ЛЗ-ТК-2.

2 Разработать конструктивные и технологические решения для обеспечения минимальных потерь из-за объёмных потерь рабочей жидкости во второй ступени ЭНА.

3 Разработать систему компоновочных и конструктивных решений, обеспечивающих достижение минимально возможных нагрузок на подвижные элементы ЭНА.

4 Подтвердить обеспечение ресурса ЭНА не менее 142000 часов (15 лет).

Объект исследования:

Объектом исследования является ЭНА для перспективных КА со сроком активного существования (САС) не менее 15 лет (142000 часов), основные параметры которого при температуре теплоносителя $(25 \pm 10)^\circ\text{C}$:

- перепад давлений не менее $1,25 \text{ кгс/см}^2$;
- объёмный расход $120 - 150 \text{ см}^3/\text{с}$;
- частота вращения $6000 \pm 100 \text{ об/мин}$;
- выходная мощность электродвигателя при напряжении питания 100 В, не более 40 Вт.
- потребляемая мощность не более 57 Вт;

- ресурс не менее 142000 ч;

ЭНА предназначен для обеспечения циркуляции теплоносителя в гидротракте СТР автоматического КА.

В состав ЭНА входят:

1) корпус для параллельной установки двух центробежных насосов, основного и резервного. В корпусе устанавливается обратный клапан для переключения потоков основного и резервного насосов;

2) два бесконтактных электродвигателя противоположного вращения, присоединяемых к корпусу сваркой через переходное биметаллическое (алюминий-титан) кольцо, два полупроводниковых преобразователя;

3) две пары рабочих колёс, каждая из которых устанавливается на валу одного двигателя;

4) две разборных обоймы, разделяющие полости первой и второй ступеней.

[изъято 73 страницы]

ВЫВОДЫ

1 Усовершенствована методика проектного расчёта спирального сборника отвода ЭНА на базе центробежного насоса с параметрами, удовлетворяющими заданным требованиям по потребляемой мощности, что позволяет обеспечить:

- перепад давлений не менее $1,25 \text{ кгс/см}^2$;
- объёмный расход $120\text{-}150 \text{ см}^3/\text{с}$;
- частота вращения $6000 \pm 100 \text{ об/мин}$;
- выходная мощность электродвигателя при напряжении питания 100В, не более 40 Вт;
- потребляемая мощность не более 57 Вт.

2 Дополнительное тестирование используемых методов расчёта на результатах эксперимента подтвердило достаточную надёжность этих методов.

3 Расчётом подтверждено, что выбранная схема компоновки, точность изготовления и способ уплотнения составных частей ЭНА обеспечит полную реализацию преимуществ использования двухступенчатой схемы, сведя потери из-за применения двухступенчатой схемы к приемлемому минимуму в пределах $7 \text{ см}^3/\text{с}$.

4 С помощью расчётов и данных по результатам ресурсных испытаний и штатной эксплуатации аналогов разрабатываемого ЭНА подтверждено, что выбранная силовая схема двухступенчатой компоновки ЭНА с учётом всех действующих в процессе его функционирования силовых факторов обеспечивает заданный ресурс ЭНА не менее 142 тысяч часов (15 лет).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения ВКР определены преимущества использования двухступенчатого ЭНА в СТР КА с точки зрения долговечности и надёжности.

Использование двухступенчатой схемы ЭНА обеспечивает значительное снижение нагрузок на конструкцию и значительное повышение перепада давления без увеличения габаритов ЭНА приблизительно на 50%.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

СТР	-	система терморегулирования;
КА	-	космический аппарат;
ЭНА	-	электронасосный агрегат;
КПД	-	коэффициент полезного действия;
ЭД	-	электродвигатель;
САС	-	срок активного существования;
ЭВТИ	-	экранно-вакуумная теплоизоляция;
СС	-	спиральный сборник;
РЖ	-	рабочая жидкость.

- 1 Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3 т. / В.И. Анурьев, под ред. И. Н. Жестковой. — Москва: Машиностроение, 2001. — Т. 2. — 912 с.
- 2 Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – Москва: Наука, 1972. – 720 с.
- 3 Васильцов, О.А. Герметичные электронасосы / О.А. Васильцов, В.Г. Невелич. - Ленинград: Машиностроение, 1968. - 260 с.
- 4 Гинзбург, И.П. Теория сопротивления и теплопередачи / И.П. Гинзбург. - Изд. ЛГУ им. А.А. Жданова. - Москва: Машиностроение, 1970. - 376 с.
- 5 Зайдель, А.Н. Погрешности измерений физических величин / А.Н. Зайдель. – Ленинград : Наука, 1985.-112 с.
- 6 Кривченко, Г.И. Насосы и гидротурбины /Г.И. Кривченко. - Москва: «Энергия», 1970. -448 с.
- 7 Караханьян, В.К. Метод расчета осевой силы в центробежном насосе с учетом режима его работы / В.К. Караханьян.– Москва: Теплоэнергетика, 1977. - №8. - С. 60-65.
- 8 Косторной, С.Д. Проектирование спиральных отводов центробежных насосов трапецеидальной формы со скругленными углами / С.Д. Косторной, А.А. Чаплыгин. –Вестник Сум. ДУ. Серия «Технической науки», № 3 2010. Том. 1. – С.105-116
- 9 Логанов, А. А. Моделирование характеристик насосов системы терморегулирования /А. А. Логанов, Э. М. Ямашев.–Изв. вузов. Приборостроение. 2011. т. 54, № 4, с. 24-28.
- 10 Михайлов, А.К. Лопастные насосы. Теория, расчёт и конструирование / А.К. Михайлов, В.В. Малюшенко.– Москва: Машиностроение, 1977. – 288 с.

11 Овсянников, Б.В. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей/ Б.В. Овсянников, Б.И. Боровский.— Москва: Машиностроение, 1971.-540 с.

12 Расчет и проектирование малорасходных насосов с оптимизацией энергетических характеристик. Отчет по теме 1К. 15(75). № Гос. регистрации Х-62925.; КИКТ. – Красноярск, 1990. - 139 с.

13 Тепло и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Е.В. Аметистов, В.А. Григорьев, Б.Т. Емцев [и др.];отв. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина.—Москва, 1982. - 512 с.

14 Designing an ultra-low specific speed centrifugal pump. /H. Satoh, K.Ushida, Y. Cao// Pros. 22nd Int. Pump users Symp. 2005. p. 16-21.

15 Centrifugal Pumps / Gulich, J.F.-Berlin-Heidelberg, Springer-Verlag 2010. – 998 p.

16 Kreiselpumpen. Berechnung und Konstruktion der hydrodynamischen Komponenten / Wesche, W. - Berlin-Heidelberg, Springer-Verlag, 2012. – 320 S.

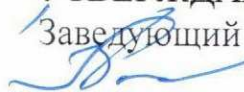
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт
институт

Межинститутская базовая кафедра
«Прикладная физика и космические технологии»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой


В.Е. Косенко
подпись инициалы, фамилия

« 11 » июня 2019 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Проектирование электронасосного агрегата для космических
аппаратов повышенной мощности»
тема

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных
производств»
код и наименование направления

15.04.05.02 «Технология космических аппаратов»
код и наименование магистерской программы

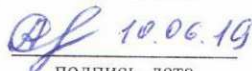
Научный
руководитель


10.06.19
подпись, дата

доцент МБК ПФиКТ,
канд.техн.наук
должность, ученая степень

В.Н.Наговицин
инициалы, фамилия

Выпускник


10.06.19
подпись, дата

А.В. Смирнов
инициалы, фамилия

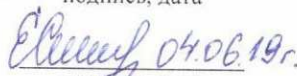
Рецензент


10.06.19
подпись, дата

начальник группы
30212 АО «ИСС»
канд.техн.наук
должность, ученая степень

А.А. Логанов
инициалы, фамилия

Нормоконтролёр


04.06.19г.
подпись, дата

Е.С. Сидорова
инициалы, фамилия

Красноярск 2019